

## Sík szabadsugár akusztikus gerjesztésének vizsgálata

### Modelling the acoustically excited plane jet

SZABÓ András<sup>1</sup>, PhD hallgató, Dr. NAGY Péter Tamás<sup>2</sup>, egyetemi adjunktus,

Dr. PAÁL György<sup>3</sup>, egyetemi tanár

<sup>1,2,3</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Kar, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék  
1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3. D. épület 3. emelet  
Tel.: 06-1-463-16-80

E-mail: [aszabo@hds.bme.hu](mailto:aszabo@hds.bme.hu)<sup>1</sup>, [paal@hds.bme.hu](mailto:paal@hds.bme.hu)<sup>2</sup>

Honlap: <http://www.hds.bme.hu>

#### Kivonat

*A fúvós hangszerekben lejátszódó folyamatokra nem áll rendelkezésre megfelelő pontosságú koncentrált paraméterű modell. Jelen kutatásban a koncentrált paraméterű modellek egy elemével, az érzékenység modellezésével foglalkozunk, amely az akusztikus rezonátorok a szabadsugárra kifejtett hatását veszi figyelembe. A korábban a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszéken modellt fejlesztettünk, amellyel összenyomhatatlan áramlás esetén figyelembe vehető az akusztikus gerjesztés hatása. A modell eredményeit összehasonlítottuk az irodalomban található mérésekkel, és részletesen elemezzük az eltérések okait.*

**Kulcsszavak:** fúvós hangszer, szabadsugár, érzékenység modell, összenyomhatatlan szimuláció

#### Abstract

*Currently there is not any existing lumped model which models flue instruments with the desired accuracy. In this paper we investigate an important piece of the lumped models, the receptivity of the jet, which models the forcing of the acoustic resonator on the jet. Previously at the Department of Hydrodynamic Systems a model was developed, with which the effect of the acoustic forcing in an incompressible flow can be taken into account. We compare the results of the model with measurements from the literature and analyse the differences in detail.*

### 1. BEVEZETÉS

A fúvós hangszerekben lejátszódó folyamatokkal számos kutatás foglalkozik. A fúvós szerek általunk vizsgált csoportja (amelybe az orgonasípok és a furulya is tartozik), a következő elemekből áll: egy sík szabadsugár, egy ajak, amely egy ék a szabadsugár útjában, valamint egy rezonátorból. A sík szabadsugár a fúvókából kilépve az ék felé halad, és a rezonátor külső gerjesztése hatására instabilitási hullámok keletkeznek benne, amelyek az áramlással együtt haladva növekednek. Az így lengésbe jövő szabadsugár az ajakkal találkozáskor aeroakusztikai gerjesztést hoz létre, amelyek fenntartják az akusztikus rezonátorban lévő lengéseket, bezárva a visszacsatolási kört. A dinamika mélyebb megértése céljából lehetséges a teljes hangszer szimulációja, amely során az összenyomható áramlást leíró egyenleteket megfelelően finom diszkretizációval (direkt numerikus szimuláció). Azonban ezek a szimulációk rendkívüli számítási kapacitást igényelnek, így paramétertanulmány készítésére nem alkalmasak. Egy másik modellezési módszer egy koncentrált paraméterű modell készítése, amelyben a visszacsatolási kör egyes részei a modell elemei. Egy ilyen modell előnye, hogy az ezzel végzett szimulációk számítási igénye nagyságrendekkel kisebb a nagy pontosságú direkt numerikus szimulációkéénál, viszont ezek jelenleg csak kvalitatív összehasonlításra alkalmasak. Munkánk során az érzékenység modellezésével foglalkozunk, amely a fúvós hangszerek visszacsatolási körében az egyik legnehezebben figyelembe vehető elem [1]. Az általunk használt modellt a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszéken fejlesztettük ki [2], és ez a módszer lehetőséget ad a jelenlegi koncentrált paraméterű modellek pontosságának

növeléséhez. A kutatás célja a modell összehasonlítása az irodalomban található mérésekkel, és az eredmények részletes elemzése. A következőkben röviden ismertetjük a modell fő elemeit, majd a szimuláció eredményeit hasonlítjuk össze mérésekkel.

## 2. A MODELL ISMERTETÉSE

Az alábbiakban számítási modellnek csak az alapelveit ismertetjük, a modell részletes leírása megtalálható a szakirodalomban. A modell alapgondolatát az ún. Lighthill-analógia inspirálta. A Lighthill-analógia alapgondolata, hogy az áramlás által keltett hanghullámok terjedését vizsgálhatjuk akusztikai számításokban úgy, hogy az összenyomhatatlan áramlást mint zajforrást forrástagokkal vesszük figyelembe akusztikai számításokban, ezzel szétválasztva a két problémát. A forrástagok számításának elve, hogy azokkal az akusztikai számításokban visszkapjuk a teljes nyomásmezőt (ami a valós összenyomható áramlásban szerepel).

A Nagy és Paál [2] által javasolt modell ennek a fordítottját javasolja: ha egy külső akusztikus tér gerjeszt egy áramlást, és az áramlás oldaláról nincs visszahatás az akusztika irányába, akkor az akusztikus mező hatása az áramlásra szintén forrástagokkal vehető figyelembe az összenyomhatatlan áramlást leíró kontinuitási egyenletben. Ezzel a forrástaggal az összenyomható áramlás teljes sebességmezőjét visszkapjuk.

A módszer alapfeltételezése, hogy a Mach-szám, amely az áramlás jellemző sebességléptékének és a hangsebességnek a hányadosa, alacsony, valamint az akusztikus mezőt a jól ismert lineáris akusztikai egyenletek írják le. Ekkor a kontinuitási egyenletben az akusztikus mező hatását modellező forrástag alakja a következő:

$$S_c = \rho \nabla \cdot v_{ac}, \quad (1)$$

itt  $S_c$  jelöli a forrástagot,  $\rho$  az összenyomhatatlan közeg sűrűsége,  $v_{ac}$  az akusztikus sebességmező, valamint  $\nabla \cdot$  a divergencia operátort jelöli. Fontos kitétel, hogy a számításoknál a peremfeltételek esetében az áramlási és az akusztikus mezők összegét kell használnunk. Megmutatható továbbá, hogy ha a vizsgált probléma akusztikai szempontból kompakt, azaz az akusztikus hullámok hullámhossza lényegesen nagyobb mint a vizsgált geometria jellemző mérete, akkor az (1) egyenletben szereplő forrástag elhagyható, és az akusztikus mező modellezhető pusztán a módosított peremfeltételeken keresztül.

Hasonló tagok vezethetők le az áramlást leíró mozgásegyenletekre, azonban megmutatható, hogy ezek nagyságrendje elhanyagolható.

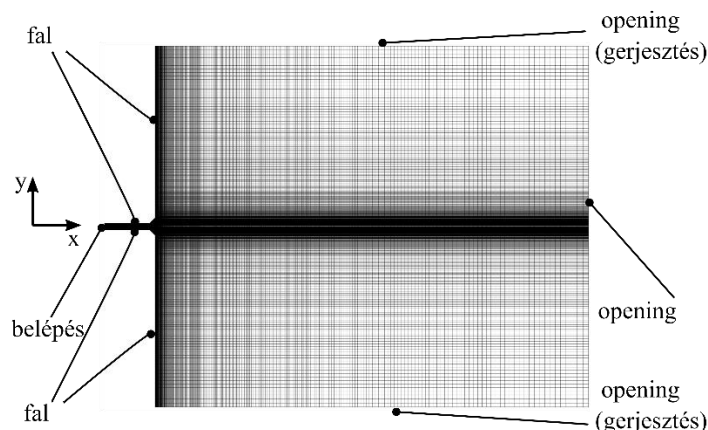
## 3. A SZÁMÍTÁSI MODELL

A szimulációkat ANSYS CFX szoftverrel készítettük, amely a véges térfogatok módszerével oldja meg a Navier-Stokes egyenleteket. A geometriát úgy alakítottuk ki, valamint a szimuláció paramétereit úgy adtuk meg, hogy az megegyezzen a modellezett kísérletekéivel [3, 4]. A legfontosabb paraméter a Reynolds-szám, amelyet a következő módon definiáltunk:

$$Re = \frac{U_c h}{\nu}, \quad (2)$$

itt  $U_c$  a szabadsugar középvezetékének sebessége a középvezetéken,  $h$  a fúvóka magassága,  $\nu$  pedig a levegő kinematikai viszkozitása.

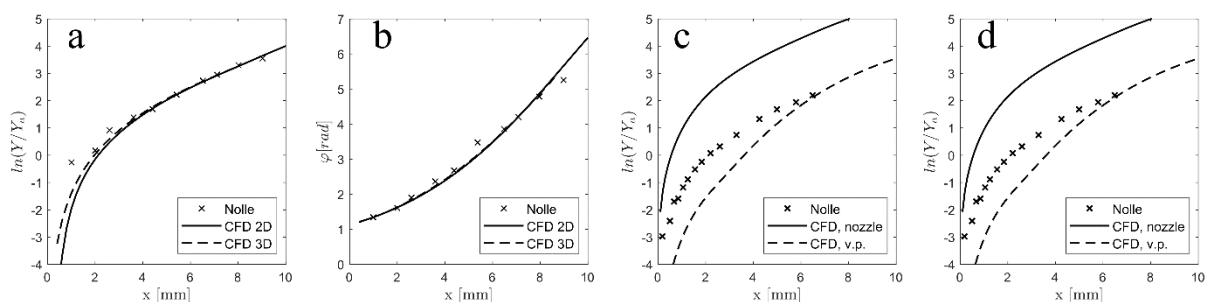
A kísérletekben a folyadék először egy előkamrába érkezik, majd innen áramlik a fúvókába, majd ezután távozik a szabad térbe, ahol a gerjesztést hangszórók által keltett sík akusztikus hullámok biztosítják. Hogy csökkentsük a számítási igényt, a szabadsugar szimulációjában csak a fúvóka fele szerepel, és a belépő sebességprofil a fúvóka előtti kamra szimulációjával határoztuk meg. A fúvóka azért nem hagyható el teljesen, mivel oda behatolnak a hanghullámok, és ezt is figyelembe kell vennünk a modellezés során.



1. ábra A szimulációkhoz használt háló, valamint a peremfeltételek

A két kísérletben különböző a folyadék: az egyik esetben a szabadsugár közege is és a környező nyugvó közeg is levegő, míg a másik esetben egy  $\text{CO}_2$  szabadsugár érkezik a nyugvó levegőbe. Az utóbbi esetben többkomponensű szimulációkat készítettünk, hogy megfelelően modellezzük a két közeg keveredését. Mivel a kísérletekben az akusztikus gerjesztés kompakt, azaz az akusztikai hullámok hullámhossza lényegesen nagyobb a geometria jellemző hosszleptékénél, így az akusztikus gerjesztés hatása modellezhető pusztán fluktuáló nyomás peremfeltételekkel.

A mérésekben a szabadsugár középvonalának elmozdulását mérték az idő és a hely függvényében, és ennek a Fourier-transzformáltjának a domináns frekvenciához (amely a legnagyobb amplitúdóval rendelkezik) tartozó komponensét vizsgálták a hely függvényében. A szabadsugár középvonalának kitérését különböző módokon számítottuk. Egykomponensű közeg szimulációja esetén lehetőség van elhanyagolhatóan kis tömegű részecskéket adagolni az áramlásba, amelyek pályája leírja a szabadsugár középvonalának kitérését, mivel az egy nyomvonal. Többkomponensű szimulációk esetén erre nincs lehetőség az ANSYS CFX szoftvertben, ezért a részecskék trajektóriáját MATLAB programmal számítottuk. Egy másik, a kísérletek kiértékelésénél használt módszert is implementáltunk, amely a sebességprofilok kereszt-korrelációján alapul [3]. A két módszert összevetve a különbség 5% volt a vizsgált tartomány végén, amely alapján a számítási módszerek helyesek és a két módszer ekvivalens egymással.

2. ábra A szabadsugár középvonal kitérésének amplitúdója (a,c) és fázisa (b,d) a hely függvényében. (a,b):Parabolikus sebességprofil, (c,d): konstans sebességprofil.  $Re=546,7$ , levegő közeg,  $f=500$  Hz

#### 4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉSÜK

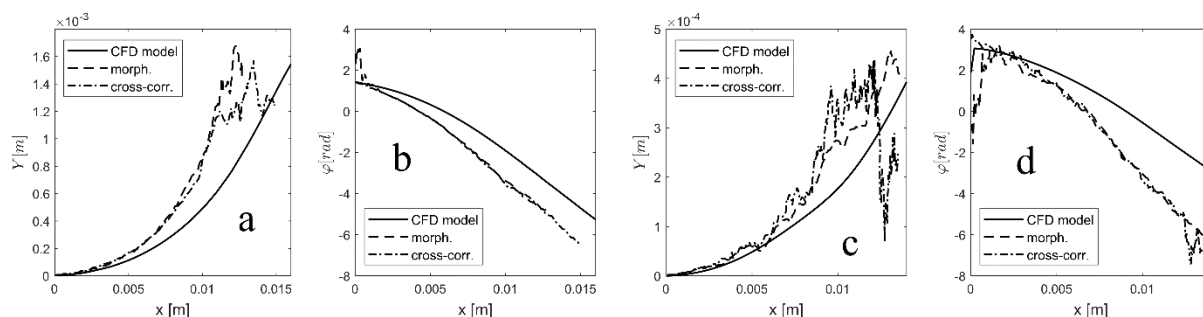
A 2. ábra (a,b) részein levegő közeg és közel parabolikus sebességprofil esetén hasonlítottuk össze a kísérletek és a szimulációk eredményét,  $Re=546,7$ . Látható, hogy itt az egyezés kiváló az amplitúdó és a fázis esetén is, tehát a modell elegendően pontos. Itt 3D szimulációt is készítettünk, amely eredménye nem tér el jelentősen a 2D szimulációtól, ami megerősíti a 2D közelítés megfelelőségét.

A 2. ábra (c,d) részein szintén levegő közeg és közel konstans belépő sebességprofil esetén látható az összehasonlítás,  $Re=546,7$ . Itt két esetet vizsgáltunk: egyszer fúvókával, egyszer pedig fúvóka nélkül

szimuláltuk az áramlást. Utóbbi esetben azt a belépő sebességprofilt írtuk elő, amelyet a kísérletek során a fúvókától áramlási irányban 2 mm-re mértek. Látható, hogy az eltérések igen nagyok.

A kapott sebességprofilokat összehasonlítottuk, és ezekben is jelentős eltéréseket tapasztaltunk. Mivel ismert, hogy a sebességprofil alakja nagy hatással van a szabadsugár érzékenységre, ezért valószínű, hogy a sebességprofil alakjából adódó pontatlanság az eltérés oka.

A 3. ábrán  $\text{CO}_2$  közeg esetén láthatók a kísérletek és a CFD modell összehasonlítása két Reynolds-szám esetén. Az ábrákból leolvasható, hogy a modell alapján a lengések amplitúdója alacsonyabb, mint a mérésekben, azonban az eltérések mértéke elfogadható. Ez alapján a modell képes többkomponensű módszerek esetén is az amplitúdó megfelelő becslésére. Az eltérések okában, a 2. ábra (c,d) részeihez hasonlóan, valószínűsíthetően jelentős szerepe van a kísérlet nem megfelelő modellezésében pl.: sebességprofilok eltérése jelentősen hathat a lengések amplitúdójára, de a folyadékok sűrűsége és hőmérséklete, illetve a geometria (apró eltérések, felületi érdesség) is hordoz bizonyos fokú bizonytalanságot.



3. ábra A szabadsugár középvonal kitérésének amplitúdója (a,c) és fázisa (b,d) a hely függvényében. (a,b):  $Re=500$ ,  $f=238$  Hz, (c,d):  $Re=3000$ ,  $f=1568$  Hz.  $\text{CO}_2$  közeg

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány pályázata és az NFKI K124939 kódszámú pályázat támogatta. A KUTATÁS Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] B. Fabre, A. Hirschberg: *Physical modeling of flue instruments: A review of lumped models*, Acta Acoustica united with Acoustica, **86**(4), pp. 599-610, 2000
- [2] P. T. Nagy, G. Paál, *Modeling the perturbation growth in an acoustically excited plane jet*, Physics of Fluids, **29**(11), 114102, 2017
- [3] P. de La Cuadra, *The sound of oscillating air jets: Physical modeling and simulations in flue-like instruments*, PhD thesis, Stanford University, 2006.
- [4] A.W. Nolle: *Sinusoidal instability of a planar air jet: Propagation parameters and acoustic excitation*, Journal of the Acoustical Society of America, **103**(6), 3690-3705, 1998.